

## ДИНАМИКА АСТЕРОИДОВ — КОМПАНЬОНОВ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Данная работа посвящена обзору динамики астероидов, сближающихся с Землей и движущихся в окрестности орбитального резонанса  $1/1$  с планетами. Рассмотрены основные резонансные характеристики — критический аргумент и резонансная щель, представлена классификация орбит (классический «головастик», подкова и квазиспутник). В качестве примера приведено исследование динамики некоторых астероидов в резонансе  $1/1$  с Венерой и Землей.

The paper deals with survey of dynamics of Near-Earth asteroids moving in vicinity of mean-motion resonance  $1/1$  with planets. The basic resonance characteristics are critical argument and resonance band. The orbital classification (tadpole, horseshoe, quasi-satellite) are presented. For example dynamics of some asteroids in mean-motion resonance  $1/1$  with Venus and the Earth are investigated.

### Введение

Орбитальные резонансы оказывают существенное влияние на структуру как главного пояса астероидов, так и на динамику астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Особого внимания заслуживают объекты, движущиеся в резонансе  $1/1$  с большими планетами, так называемые компаньоны. Долгое время считали, что ни одна другая планета, кроме Юпитера, не может иметь своих троянцев. Открытие астероида 5261 Eureka показало, что это не так: 5261 Eureka, марсианский троянец, движется в окрестности треугольной точки либрации  $L_5$ , отставая от Марса на  $\sim 60^\circ$ . Первым объектом, обнаруженным вблизи резонанса  $1/1$  с Землей, является 3753 Cruithne [1]. В настоящее время известно несколько астероидов, движущихся в окрестности резонанса  $1/1$  с Венерой, Землей и Марсом, их движение изучается многими исследователями (см., например, [2–13]).

Исследование орбитальных резонансов в движении АСЗ представляет особый интерес, поскольку устойчивый резонанс позволяет сохранять определенные геометрические конфигурации в относительном движении астероида и больших планет [14]. А это при

благоприятных начальных условиях может служить защитным механизмом от тесных сближений [15, 16].

## Резонансные характеристики

В данной работе исследуются резонансы, определяемые соизмеримостью средних движений исследуемого астероида и большой планеты. В качестве основных резонансных характеристик традиционно рассматриваются резонансная щель и критический аргумент.

Если существует соизмеримость средних движений астероида и планеты, то конфигурация данной системы характеризуется периодичностью. В этом случае взаимные возмущения, обусловленные конфигурацией системы, будут иметь один и тот же период, что усиливает возмущения [17]. Усиление возмущений происходит в момент соединения астероида и планеты, поэтому основным является выражение для долготы соединения, следовательно, критический (резонансный) аргумент для резонанса  $1/1$  будет иметь вид  $\beta = \lambda_0 - \lambda_j$ , где  $\lambda_0$ ,  $\lambda_j$  — средние долготы астероида и  $j$ -й планеты.

В качестве еще одной резонансной характеристики используется первая производная по времени от критического аргумента, так называемая резонансная щель. Согласно работе [18] будем считать, что астероид движется в  $\alpha$ -резонансе  $1/1$  с  $j$ -й планетой, если  $\alpha = n_0 - n_j$  есть малая величина. Здесь  $n_0$ ,  $n_j$  — средние движения соответственно астероида и  $j$ -й планеты. Величину  $\alpha$  называют резонансной полосой или «щелью».

Будем считать, что астероид движется в окрестности резонанса, если  $\alpha$  и  $\beta$  колеблются около значения точной соизмеримости, так что  $|\beta - \beta_{mean}| \leq 180^\circ$  и  $|\alpha| \leq \alpha_{max}$ ;  $\beta_{mean}$  — центр либраций критического аргумента, величина  $\alpha_{max}$  характеризует границы резонансного движения и определяется по максимальной амплитуде колебаний критического аргумента  $\beta$ .

В ряде работ критический аргумент рассматривается в качестве основной характеристики резонанса. В работе [19] приводится следующее определение резонансного астероида: астероид является резонансным, если его критический аргумент либрирует или медленно циркулирует (период циркуляции больше чем 1 000 лет). Аналогичного определения придерживаются авторы работы [20]: к резонансным относятся астероиды, критический аргумент которых колеблется около неподвижного или смещающегося центра либрации. Однако резонансными могут быть астероиды, для которых в тече-

ние длительного времени сохраняется малая резонансная щель, но они не проходят через значение точной соизмеримости. В таком случае критический аргумент будет циркулировать [21]. Поэтому для исследования резонанса лучше использовать обе характеристики — резонансную щель и критический аргумент.

Резонанс  $1/1$  с большими планетами представляет особый интерес с точки зрения небесной механики, орбитальный период таких объектов незначительно отличается от орбитального периода планеты. Среди астероидов, движущихся в резонансе  $1/1$  (так называемых «компаньонов»), можно выделить три различных типа движения в системе координат, вращающейся с угловой скоростью планеты: классический «головастик» (tadpole), подкова (horseshoe) и квазиспутник (quasi-satellite) [22], что соответствует колебаниям критического аргумента около значений  $\pm 60$ ,  $180$  и  $0^\circ$  соответственно.

## **Перечень АСЗ, движущихся в окрестности резонанса $1/1$ с планетами земной группы**

Для того чтобы выявить астероиды, движущиеся в окрестности резонанса  $1/1$  с планетами земной группы, нами были проинтегрированы уравнения движения всех АСЗ на интервале времени (1016—3016 лет). Начальные данные взяты из каталога Э. Боуэлла на ноябрь 2016 г. [23]. Интегрирование уравнений движения выполнялось численно методом Эверхарта. Модель сил включала влияние больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады и Весты. Все исследования выполнялись с помощью специально разработанного программного обеспечения [24], которое позволяет осуществлять высокоточное прогнозирование движения астероидов.

Результаты представлены в табл. 1, где показаны границы изменения резонансной щели и тип движения в соответствии с поведением критического аргумента: квазиспутник (QS) или подкова (H). В ходе исследования не было обнаружено ни одного астероида в окрестности резонанса  $1/1$  с Меркурием. Сложно сказать, связано это с тем, что Меркурий не способен удержать малое тело в соизмеримости средних движений, или мы имеем дело с эффектом наблюдательной селекции. Возможно, играют роль оба фактора.

Венере повезло чуть больше, — она имеет квазиспутник 2002 VE68. Следует отметить, что еще несколько астероидов движутся в окрестности резонанса с Венерой на некоторых интервалах времени, меньших рассматриваемых 2000 лет.

Таблица 1. Перечень АСЗ, движущихся в окрестности резонанса 1/1 с планетами земной группы

Объект	$\alpha, ''$	Тип движения
Венера		
2002 VE68	(-14.5, 14.9)	QS
Земля		
3753 Cruithne	(-20.7, 20.6)	QS
164207 2004 GU9	(-27.7, 28.2)	QS, H
255071 2005 UN6	(-29.6, 31.5)	QS, H
277810 2006 FV35	(-21.4, 16.6)	QS
419624 2010 SO16	(-27.8, 27.9)	H
469219 2016 HO3	(-35.7, 35.9)	QS, H
2001 GO2	(-40.7, 41.3)	H
2002 AA29	(-45.1, 45.5)	H
2010 TK7	(-19.2, 19.4)	QS
2013 LX28	(-14.2, 14.3)	QS
2014 OL339	(-17.8, 19.4)	QS
2015 SO2	(-37.7, 37.9)	H
2016 CA138	(-28.9, 29.0)	H, QS
2016 CO246	(-36.2, 36.5)	H

В пользу эффекта наблюдательной селекции относительно Меркурия и Венеры говорит большое число объектов в окрестности резонанса 1/1 с Землей. Таковых в настоящее время насчитывается 14, что дает нам возможность предположить, что аналогичные астероиды в окрестности резонанса с Венерой в настоящее время пока просто не открыты вследствие сложности наблюдений внутренней относительно Земли части Солнечной системы. Ответ на этот вопрос могут дать космические наблюдения.

Земля обладает пятью квазиспутниками (3753 Cruithne, 277810 2006 FV35, 2010 TK7, 2013 LX28, 2014 OL339), пять объектов движутся по подковообразным орбитам (419624 2010 SO16, 2001 GO2, 2002 AA29, 2015 SO2, 2016 CO246), остальные астероиды (164207 2004 GU9, 255071 2005 UN6, 469219 2016 HO3, 2016 CA138) меняют характер движения в течение рассматриваемых 2 000 лет. Ни одного АСЗ, движущегося в окрестности треугольных точек либрации, об-

наружено не было. Чуть меньше половины из представленных астеродов нумерованные, то есть их орбита хорошо определена, два объекта открыты в 2016 г.

## Динамика некоторых резонансных АСЗ

Рассмотрим динамику некоторых АСЗ в окрестности резонанса 1/1 с Венерой и Землей более подробно. В качестве примера представим астероид 2002 VE68 и разные типы движения в окрестности резонанса с Землей — 3753 Cruithne, 164207 2004 GU9 и 419624 2010 SO16. На рис. 1 показаны проекции их орбит на плоскость эклиптики в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Венеры и Земли, а в табл. 2 — эллиптические элементы орбиты на эпоху 08.11.2016. На рис. 2—5 представлена орбитальная эволюция перечисленных астероидов.

Таблица 2. Элементы орбит некоторых АСЗ, движущихся в окрестности резонанса 1/1 с планетами земной группы

Объект	$a$ , а. е.	$e$	$i$ , °
2002 VE68	0.72359313	0.41034857	9.007015
3753 Cruithne	0.99768950	0.51489660	19.806407
164207 2004 GU9	1.00133679	0.13614934	13.650181
419624 2010 SO16	1.00264554	0.07534635	14.521012

На рис. 2 показаны тесные сближения с Меркурием и Землей и эволюция резонансных характеристик для астероида 2002 VE68. Астероид 2002 VE68 сближается с Меркурием и Землей, однако сближения не очень тесные — за пределами соответствующих сфер Хилла. Тем не менее большое число сближений приводит к нерегулярным колебаниям резонансной щели в окрестности точной соизмеримости в пределах от  $-15$  до  $15''$ /сут. С начала интервала исследования (1016 г.) и до середины текущего тысячелетия критический аргумент либрирует около значения  $0^\circ$  с амплитудой порядка  $40^\circ$ , то есть астероид является квазиспутником Венеры. После 2500 г. центр либрации смещается (возможно, под влиянием многочисленных сближений), однако 2002 VE68 продолжает двигаться в устойчивом резонансе. Резонанс в данном случае служит защитным механизмом от сближений.

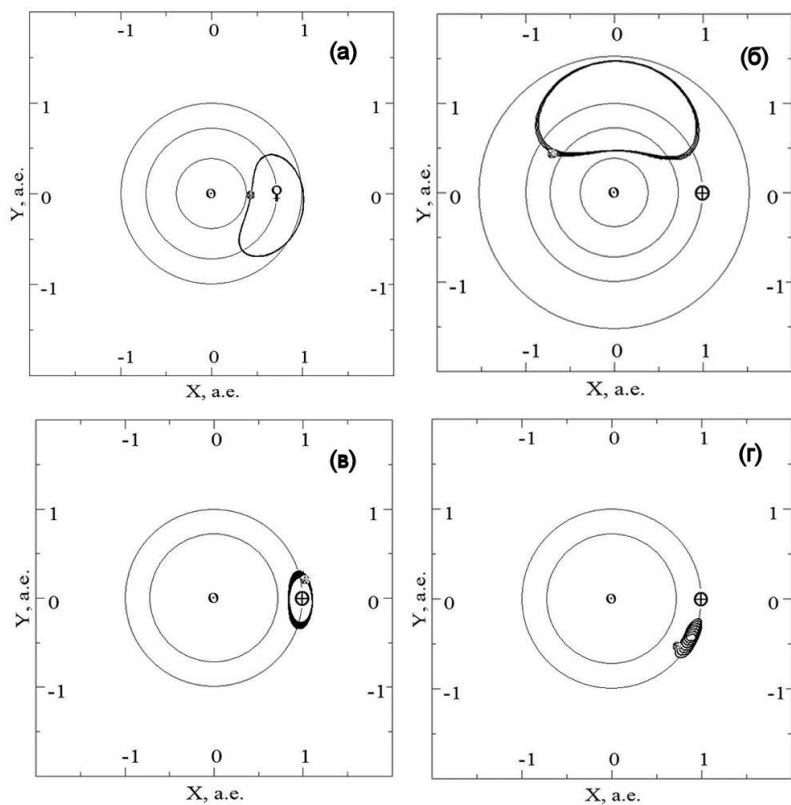


Рис. 1. Проекция орбит астероидов 2002 VE68 (а), 3753 Cruithne (б), 164207 2004 GU9 (в) и 419624 2010 SO16 (г) на плоскость эклиптики в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Венеры (а) и Земли (б, в, г) соответственно

Рисунок 3 содержит данные об орбитальной эволюции астероида 3753 Cruithne: сближения с Землей и Марсом и эволюцию резонансных характеристик. На всем рассмотренном интервале резонансная щель колеблется около нуля с небольшой амплитудой. Центр либрации критического аргумента немного смещен относительно  $0^\circ$ , амплитуда колебаний максимальна. Несмотря на наличие устойчивого резонанса, объект сближается с Землей, однако сближения не очень тесные.

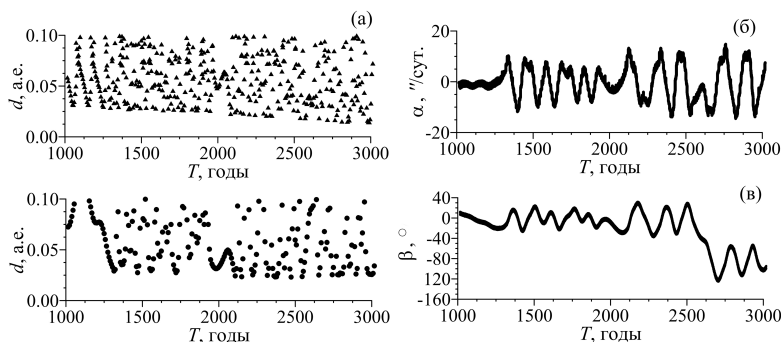


Рис. 2. Астероид 2002 VE68: сближения с Меркурием ( $\Delta$ ) и Землей ( $\bullet$ ) (а), эволюция резонансной щели (б) и критического аргумента (в)

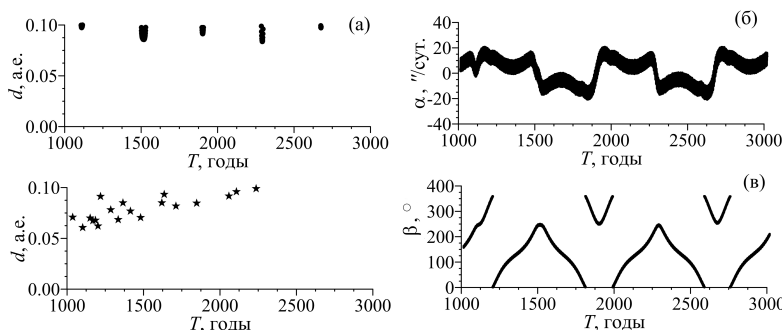


Рис. 3. Астероид 3753 Cruithne: сближения с Землей ( $\bullet$ ) и Марсом ( $*$ )(а), эволюция резонансной щели (б) и критического аргумента (в)

Астероид 164207 2004 GU9 (рис. 4) чередует поведение, характерное для квазиспутника, и движение по подковообразной орбите. Причем в первом случае ( $\pm 500$  лет от текущей эпохи) амплитуда колебаний резонансной щели существенно меньше и сближения отсутствуют, в остальное время сближения с Землей не тесные (такого же порядка, как и у 3753 Cruithne).

Последний изучаемый объект 419624 2010 SO16 (рис. 5) на рассматриваемом интервале не испытывает сближений с планетами, резонансная щель регулярно колеблется около нуля, а критический аргумент — около  $180^\circ$ .

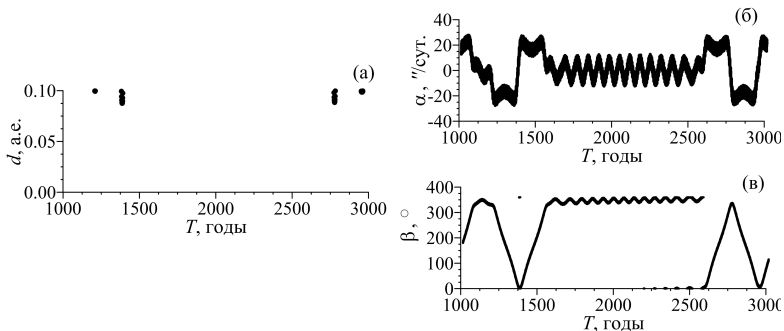


Рис. 4. Астероид 164207 2004 GU9: сближения с Землей (•)(a), эволюция резонансной щели (б) и критического аргумента (в)

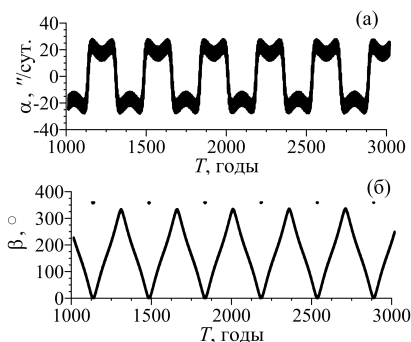


Рис. 5. Астероид 419624 2010 SO16: эволюция резонансной щели (a) и критического аргумента (б)

## Заключение

Наблюдения планет и астероидов показывают наличие в Солнечной системе большого числа соизмеримостей между средними движениями планет и астероидов. Говорят, что астероид и планета движутся вблизи некоторой соизмеримости, если периоды обращений астероида и планеты относятся между собой приблизительно как взаимно простые малые числа. Такую соизмеримость обычно называют орбитальным резонансом. Явление резонанса можно охарактеризовать величиной резонансной щели и критическим аргументом.



С точки зрения небесной механики особый интерес представляет резонанс 1/1. В настоящее время известны один астероид (2002 VE68), движущийся в окрестности резонанса 1/1 с Венерой на интервале времени  $\pm 1000$  лет от текущей эпохи, и 14 объектов в резонансе 1/1 с Землей на том же интервале времени. В работе кратко рассмотрена динамика некоторых из них.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 15–02–02868а.

## Библиографические ссылки

1. *Wiegert P., Innanen K. A., Mikkola S.* The orbital evolution of Near-Earth asteroid 3753 // *Astron. J.* — 1998. — P. 2604–2613.
2. *Tancredi G.* An asteroid in a Earth-like orbit // *Celes. Mech. Dyn. Astron.* — 1998. — P. 119–132.
3. *Tabachnik S. A., Evans N. W.* Asteroids in the inner Solar system — I. Existence // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2000. — Vol. 319. — P. 63–79.
4. *Mikkola S., Brasser R., Wiegert P., Innanen K. A.* Asteroid 2002 VE68, a quasi-satellite of Venus // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 351. — P. L63–L65.
5. *Taylor P. A., Margot J.-L., Nicholson P. D. et al.* Properties of Horseshoe Object 2000 PH5 From Radar Observations // *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #36 : Bulletin of the American Astronomical Society.* — 2004. — Vol. 36. — P. 1181.
6. *Morais M. H. M., Morbidelli A.* Population of NEAs in Coorbital Motion with Venus // *American Astronomical Society, DPS meeting.* — 2005. — Vol. 37.
7. *Connors M., Stacey G., Brasser R., Wiegert P.* A survey of orbits of co-orbitals of Mars // *Planetary and Space Science.* — 2005. — Vol. 53, iss. 6. — P. 617–624.
8. *Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю.* Исследование либрационных движений АСЗ в окрестности резонанса 1/1 с большими планетами // *Материалы всероссийской конференции «Астероидно-кометная опасность — 2005», 3–7 окт. 2005 г. — СПб., 2005. — С. 79–82.*

9. *Wajer P.* Dynamical evolution of Earth's quasi-satellites: 2004 GU9 and 2006 FV35 // *Icarus*. — 2010. — Vol. 209. — P. 488–493.
10. *Christou A. A., Asher D. J.* A long-lived horseshoe companion to the Earth // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 414. — P. 2965–2969.
11. *Галушина Т. Ю.* Исследование вероятностной орбитальной эволюции астероидов в окрестности резонанса 1 : 1 с Землей // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. — 2013. — Vol. 4, iss. 2. — P. 31–36.
12. *de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R.* Asteroid 2013 ND15: Trojan companion to Venus, PHA to the Earth // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 439. — P. 2970–2977.
13. *Галушина Т. Ю., Скрипниченко П. В., Титаренко Е. Ю.* Исследование динамики астероидов — компаньонов Венеры // *Изв. вузов. Физика*. — 2016. — Т. 59, вып. 9. — С. 65–72.
14. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — С. 588.
15. *Быкова Л. Е.* Резонансные астероиды, сближающиеся с Землей // *Физика космоса : тр. 32-й Международ. студ. науч. конф., 3–7 февр. 2003 г.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2003. — С. 22–40.
16. *Галушина Т. Ю.* Динамика резонансных астероидов // *Физика космоса : тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., 1–5 февр. 2016 г.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — С. 43–58.
17. *Гринберг Р.* Орбитальный резонанс в движении естественных спутников // *Спутники планет / ред. Дж. Бернс*. — М., 1980. — С. 189–202.
18. *Гребеников Е. А., Рябов Ю. А.* Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. — М. : Наука, 1978. — С. 128.
19. *Yoshikawa M.* Motions of asteroids at the Kirkwood Gaps II. On the 5/2, 7/2, and 2/1 resonances with Jupiter // *Icarus*. — 1991. — Vol. 92. — P. 94–117.
20. *Hahn G., Lagerkvist C.-I., Lindgren M., Dahlgren M.* Orbital evolution studies of asteroids near the 5/2 mean motion resonance with Jupiter // *Astron. Astrophys.* — 1991. — Vol. 246. — P. 603–618.

21. Чеботарев Г. А. Структура кольца малых планет // Малые планеты / ред. Н. С. Самойлова-Яхонтова. — М., 1973. — С. 151—203.
22. Jackson J. Retrograde satellite orbits // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1913. — Vol. 74. — P. 62—82.
23. Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H. A public-domain asteroid data base // In Asteroids, Comets, Meteors, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. — 1994. — P. 477—481.
24. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2012. — Т. 55, вып. 10/2. — С. 89—96.